

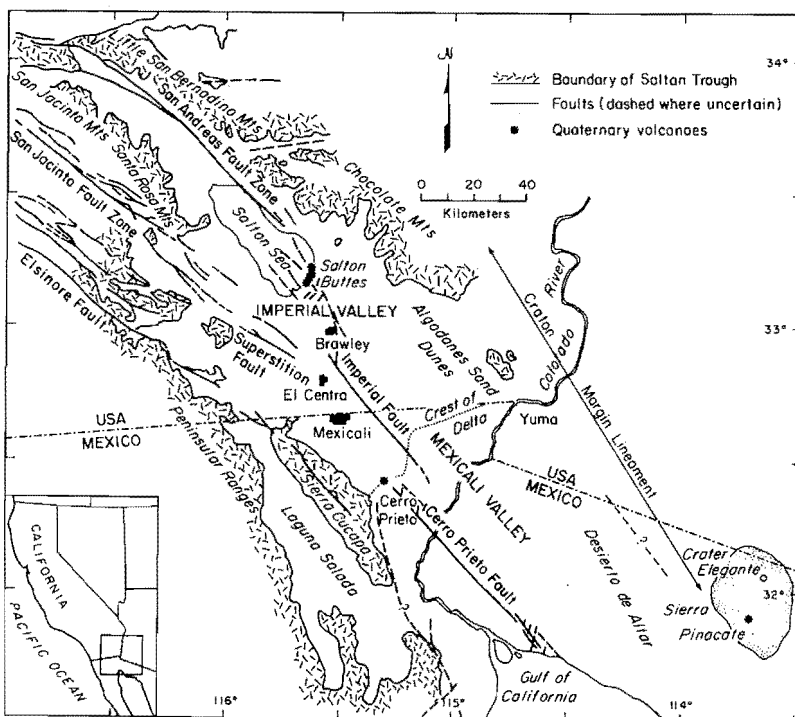
INTERSECTING FAULTS AND SANDSTONE STRATIGRAPHY AT THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

Stephen Vonder Haar and J. H. Howard
Lawrence Berkeley Laboratory
University of California
Berkeley, California 94720

ABSTRACT

The northwest-southeast trending Cerro Prieto fault is part of a major regional lineament that extends into Sonora and has characteristics of both a wrench fault and an oceanic transform fault. It apparently penetrates deep into the basement and crustal rocks in the area and serves as a conduit for both large and rapid heat flow. Near well M-103, where the Michoacán fault zone obliquely intersects a shorter northeast-southwest trending fault, large circulation losses during drilling indicate greater permeability and hence increased natural convective fluid flow. In the southern portion of the field, there is a shear fault zone in the vicinity of wells M-48, M-91, and M-101. Temperature contour maps suggest that this shear zone aids in rapidly distributing geothermal fluid away from the Cerro Prieto fault zone, thus enhancing recharge.

We have studied the distribution of lithologies and temperature within the field by comparing data from well cuttings, cores, well logs, and geochemical analyses. Across the earliest developed portion of the field, in particular along a 1.25-km northeast-southwest section from well M-9 to M-10, interesting correlations emerge that indicate a relationship among lithology, microfracturing, and temperature distribution. In the upper portion of Reservoir A of this stratigraphic section, between 1,200 and 1,400 m, the percentage of sandstones ranges from 20 to 55. Temperatures are 225°C to 275°C based on well logs, calcite isotope maxima, and Na-K-Ca indices. Our study shows that an isothermal high in this vicinity corresponds to the lowest total percentage of sandstones. Scanning electron microphotographs of well cores and cuttings from sandstone and shale units reveal clogging, mineral dissolution,



XBL 801-6718

Figure 1. Location map of the regional geology of the Cerro Prieto geothermal field.

SALTON TROUGH FAULTING

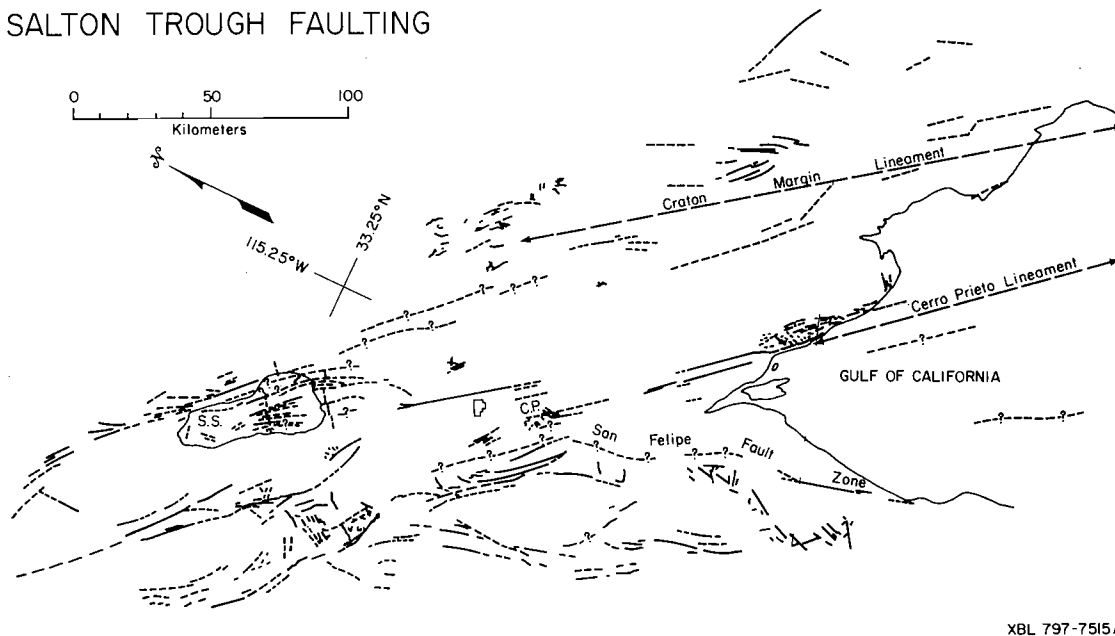


Figure 2. Salton Trough faults indicating zone of cross faulting and the major northwest-southeast hybrid transform faults.

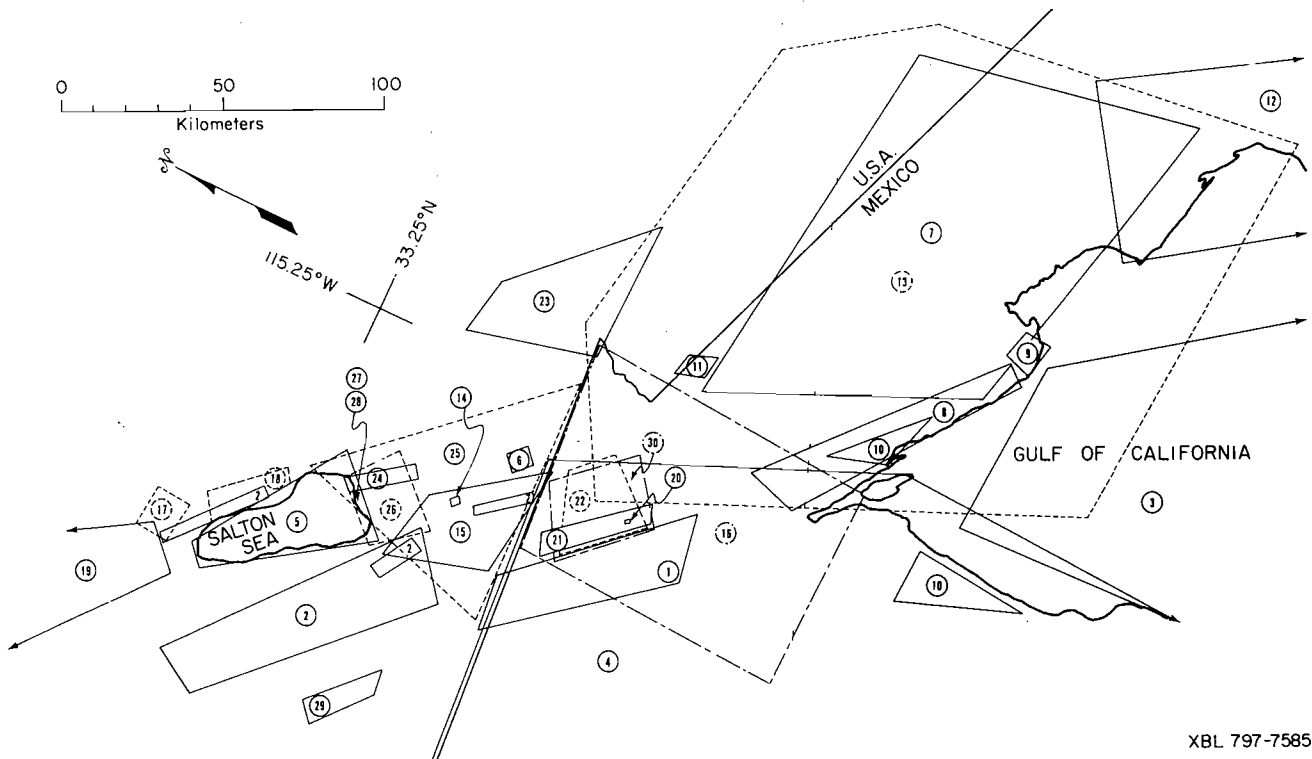


Figure 3. Key reference map to articles on Salton Trough faulting. KEY: (1) Barnard, 1968; (2) USGS, 1972; (3) Henyey and Bischoff, 1973; (4) Gastil et al., 1975; (5) Meidav and Rex, 1970; (6) Howard et al., 1979; (7) Donnelly, 1974; (8) Ortlieb, 1978; (9) Vonder Haar and Gorsline, 1977; (10) Vonder Haar and Gorsline, 1975; (11) Puente C. and Vonder Haar, 1980; (12) Gastil and Grummenschner, 1977; (13) Sumner, 1972; (14) Sharp, 1976; Johnson and Hadley, 1976; (15) Goulty and Golman, 1978; (16) De la Fuente and Sumner, 1974; (17) Sylvester and Smith, 1976; (18) Babcock, 1974; (19) Proctor, 1968; (20) Noble et al., 1977; Razo, 1976; Alonso, 1966; Reed, 1976; Mercado, 1976; Vonder Haar and Puente C., 1979; Prian C., 1979; Corwin et al., 1978; and Alonso E. et al., 1979; (21) Puente C., and de la Peña L., 1979; (22) Soto-P., 1975; (23) Crowe, 1978; (24) Kasameyer, 1976; Kasameyer et al., 1978; (25) Lofgren, 1979; (26) Meidav et al., 1976; (27) Tewhey, 1977; (28) Chan and Tewhey, 1977; (29) Todd and Hoggatt, 1976; (30) Albores et al., 1979.

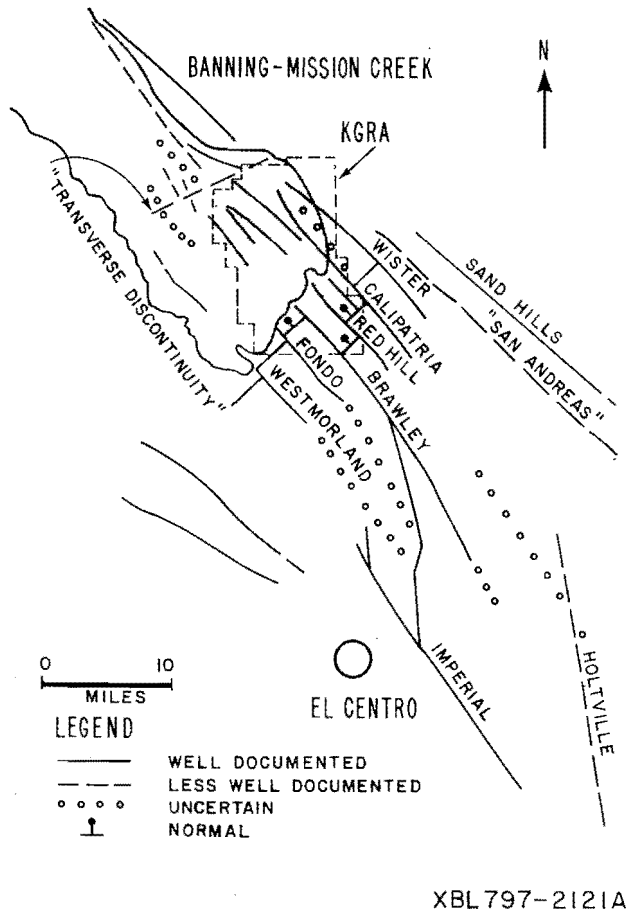


Figure 4. Structural map of the Salton Sea region based on combined geophysical data.

and mineral precipitation along microfractures. Our working hypothesis is that these sandy shale and siltstone facies are most amenable to increased microfracturing and, in turn, such microfracturing allows for higher temperature fluid to rise to shallower depths in the reservoir.

Ongoing research is aimed at achieving a coherent geological model that illustrates reservoir capacity, and at understanding fluid flow along major faults, lateral distribution through fault shear zones, and variable movement within deltaic clastics that have in part been microfractured.

INTRODUCTION

Geological evolution of the Cerro Prieto region (Fig. 1) has been a complex blend of rifting, rapid deltaic sedimentation, and large-scale strike-slip faulting. To understand geothermal fields in this region, it is important to be familiar with the fault intersections and with

the effects of tectonism and water-rock interactions on initial sandstone porosity and permeability. In this paper, we first explore analogs for the pattern of faulting at Cerro Prieto and then focus on secondary porosity and permeability in the producing horizons.

SALTON TROUGH FAULTING

In Figure 2, a detailed compilation of faulting illustrates a number of fault intersections. These data were compiled from more than 100 published and unpublished articles with many of the specific key references shown in Figure 3. The Salton Sea area has a distinct northeast-southwest series of faults, each approximately 3 km long between the Banning/Mission Creek strikeslip fault (part of the San Andreas system) and the northern end of the Brawley/Imperial strikeslip fault (Fig. 4; also Meidav and Howard, 1979).

Similar northeast-southwest trending across faults at the Cerro Prieto field (Fig. 5) have been confirmed by recent studies (Vonder Haar and Puente C., 1979; Puente C. and de la Peña L., 1979). The northwest-southeast trending Cerro Prieto fault and a parallel fault segment, the Michoacán fault, are part of a major re-

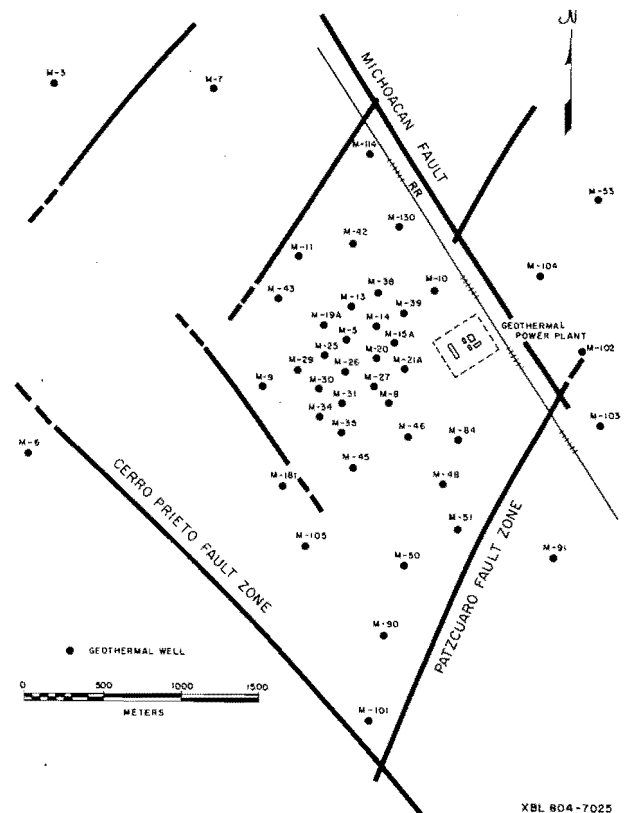


Figure 5. Faults in the vicinity of the Cerro Prieto field showing cross-faults and the very productive well M-103.

gional lineament that reaches into Sonora (Gastil and Krummenacher, 1977) and has characteristics of both a wrench fault zone and an oceanic transform fault (see Vonder Haar and Puente C., 1979). This major regional lineament is believed to penetrate deep into the crustal and basement rocks, which range from 7 km thick in the northern Gulf of California (Phillips, 1964) to as great as 20 km at the Mexican/United States international boundary (Biehler et al., 1964). This style of faulting, namely a deep penetrating regional fault with down-dropped blocks at fault intersections is important in connection with the occurrence of geothermal resources because they apparently serve as conduits for high heat flow. The oblique intersection of the Pátzcuaro fault zone and the Michoacán fault zone are associated with wells having greater permeability and are thus areas presumed to have increased natural convection. The prolific production of well M-103, large amounts of lost circulation, and the surface manifestations of the Laguna Volcano area southwest of well M-101, support this conclusion. (See the articles by De Boer, 1980; also Valette and Esquer P., 1979, for magnetic and geochemical data related to these fault intersections.)

Another facet of fault intersections is their role in aiding distribution of the geothermal fluids away from a deep penetrating fault such as the Cerro Prieto fault.

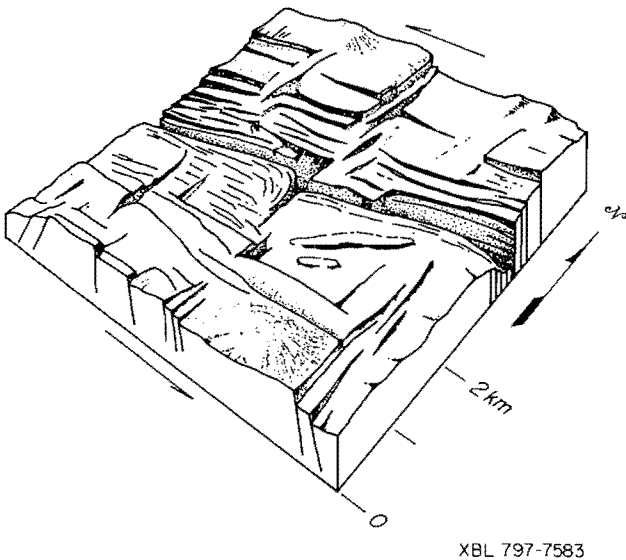


Figure 6. Interpretive block diagram of a portion of the oceanic transform fault "A" in the FAMOUS area of the Mid-Atlantic Ridge (after Choukroune et al., 1978). The intersecting faults and 200-m-wide active zone of strike-slip movement within a 4-km-wide trough suggest the possible complexity of faulting along the Cerro Prieto fault and within the production field.

Transform Fault "A" Famous Area Mid-Atlantic Ridge

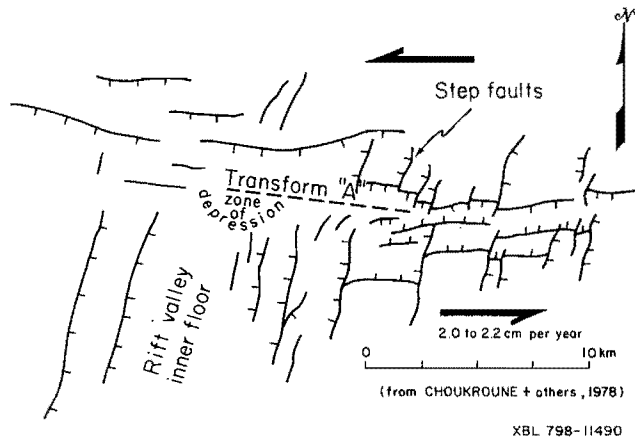


Figure 7. Diagram illustrating the complex faulting near an oceanic transform fault; a possible analog to Salton Trough faults.

Such a fault is believed to be a linear or perhaps even a discreet point source at a given moment in geologic time (see Delaney and Pollard, 1980). Such a single controlling fault should lead to a field that clusters within a few hundred meters of it. However, increased permeability, recharge capacity, and storativity that result from these fault shear zones create geothermal fields on the order of 2 to 10 km widths.

A third area of cross-faulting is (Fig. 2) approximately 100 km southeast of Cerro Prieto, where the Cerro Prieto Lineament enters the Gulf of California. These faults have been confirmed by field studies (Ortlieb, 1978). Although there is an en echelon style to the Cerro Prieto fault zone in this area, flooding frequency and duration data (Vonder Haar and Gorsline, 1979) indicate that saline surface waters would hamper ground-level geophysical surveys and drilling of shallow wells for heat flux data. Presumably a geothermal resource is present at depth.

Still another facet of faulting in the Salton Trough may pertain to the origin of Cerro Prieto volcano and the adjacent geothermal field. Both may be the result of yet another fault intersection, namely the meeting of the basin bounding San Felipe fault zone (Fig. 2) with the Cerro Prieto Lineament.

There are other indications of fault intersection in the Salton Trough/Upper Gulf of California area. Magnetic data suggest reactivation of earlier rifting faults (see de Boer, 1980) and regional gravity data indicate that the Gila Lineament extends into the Salton Trough from Arizona to near the Imperial fault's southernmost end.

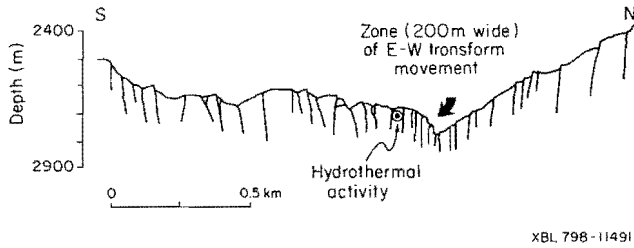


Figure 8. Section across the oceanic transform fault "A" based on deep-submersible dives showing active faulting within a wider fault zone.

TECTONIC ANALOGS TO CERRO PRIETO

The Dead Sea rift zone, oil-producing basins in southern California, and the Afar region in Africa, among others, provide stimulating comparisons to the Cerro Prieto region. However, perhaps the most useful models for faulting for Salton Trough geothermal fields come from the detailed observations by deep diving submersibles along transform faults and hydrothermal centers in the FAMOUS area of the mid-Atlantic ridge and in the Gulf of California.

Underwater exploration of transform fault "A" in the FAMOUS area is summarized in a three-dimensional block diagram (Fig. 6), on a scale appropriate to the Cerro Prieto field. As shown further in Figure 7, cross-faults and normal faults extend for up to 5 km on both sides of the present zone of active transform movement, which was located in a 200-m-wide central zone. Hydrothermal activity (Fig. 8) was noted in this zone, as were numerous step faults with as much as 250 m of cumulative displacement.

Drilling at the mouth of the Gulf of California by the Deep Sea Drilling Project (DSDP) (Geotimes, July 1979) resulted in a hypothesis about the opening of the Gulf that bears on interpretation of the structural geology in the vicinity of the Cerro Prieto field. The sequence began approximately 20 m. y. ago with weathered granite and alluvial outwash gravels. Perhaps by the late Miocene (5 to 10 m. y. ago) a rifting stage took place with listric faults (concave upward with a decrease dip angle at depth) in the basement. Around 4.5 m. y. ago, subsidence was active and the opening of the gulf began, with a transform-fault-related opening of the present gulf around 3.5 m. y. (see also Terres and Crowell, 1979). To date, geophysical studies near Cerro Prieto have not revealed listric faults in the basement. However, rotational faults related to early rifting may be confined to areas 50 km or more west and southwest of the geothermal field (see Gastil et al., 1979; Dokka and Merriam, 1979). It is important for a geological model of Cerro

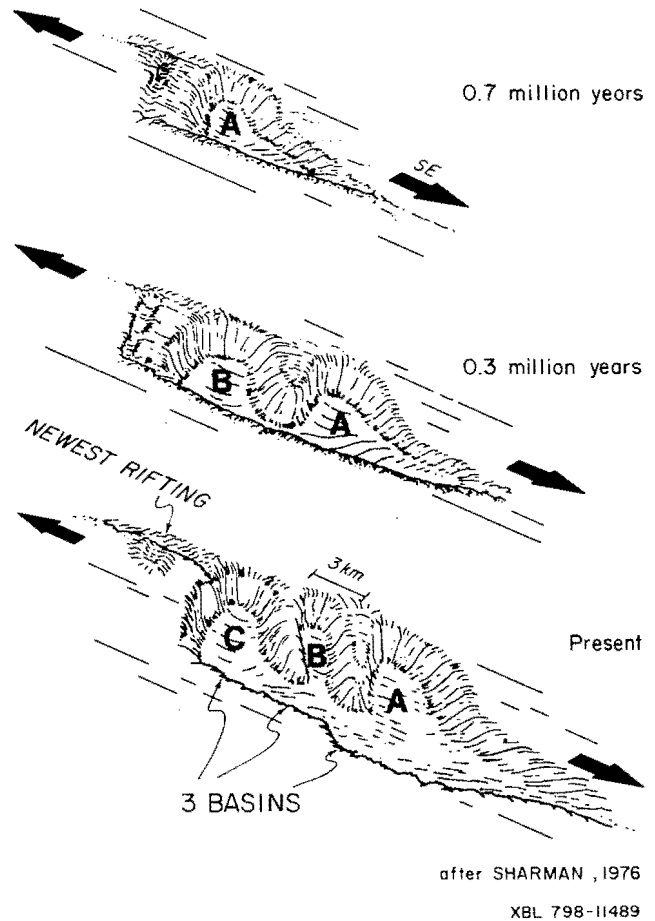
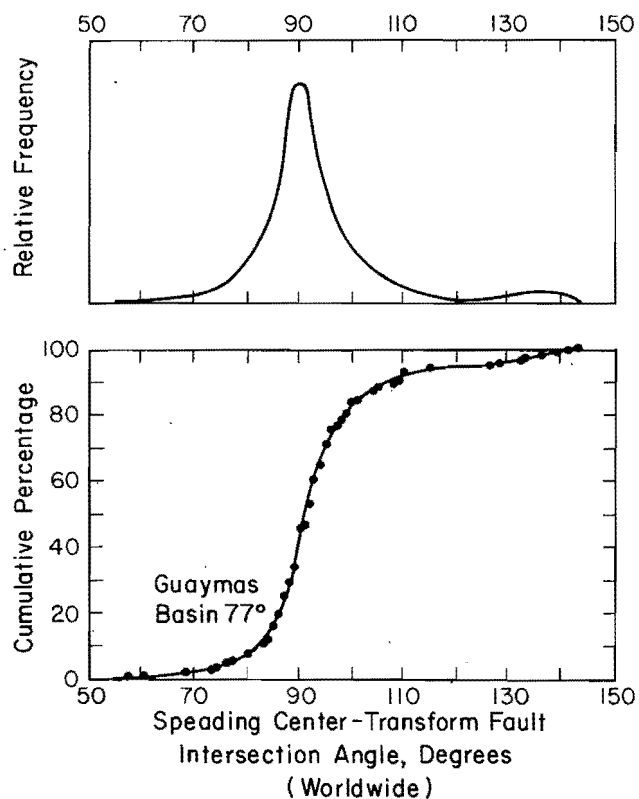


Figure 9. Interpretation of the evolution of the Carmen Basin in the Gulf of California; a possible analog to pull-apart basins in the Salton Trough. Note the asymmetry and multiple-basin formation between two transform faults.

Prieto to include older basement faults that may couple with more recent strike-slip generated faults. Such coupling would increase the potential fluid flow network along fractures thus extending the area of maximum energy available for production.

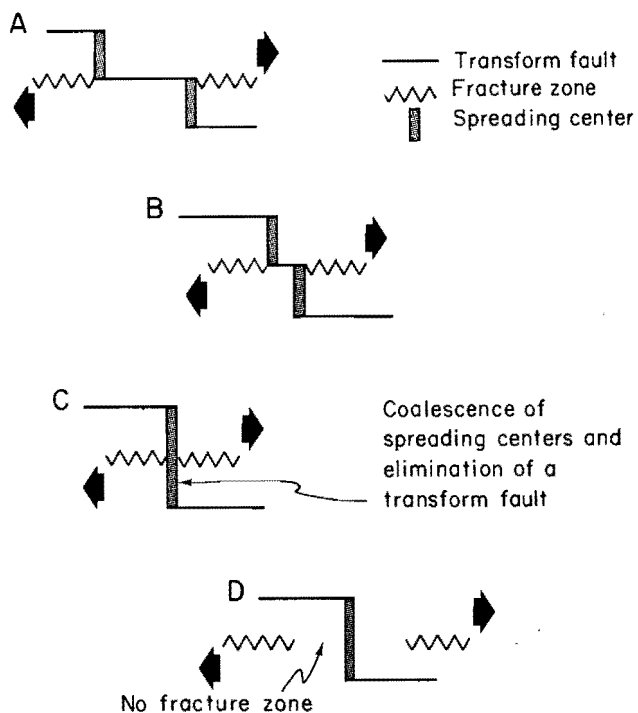
Submersible studies in the Guaymas Basin in the central Gulf of California (Lonsdale and Lawvor, 1980) are also interesting when considering the geology of the Cerro Prieto field. They show a transform fault that has a shear zone approximately 1 km wide. Cross-faults cover an area 1 to 2 km wide, and the sea bed has hydrothermal minerals, which oxygen isotopes indicate precipitated between 220° and 240°C.

Earlier investigations in the Gulf of California by Sharman (1976) provide yet another important possible model (Fig.9) for the zone between the Imperial and Cerro Prieto faults. As drilling progresses at Cerro Prieto



XBL 798-11494

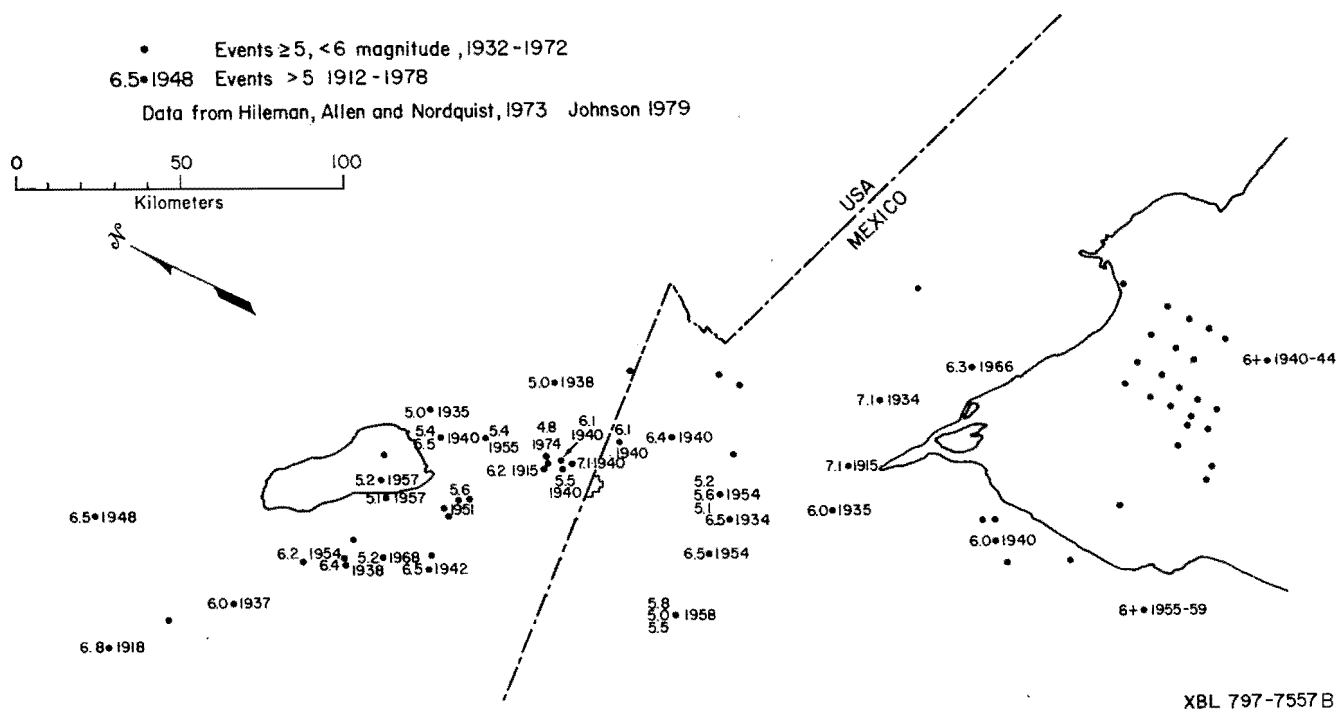
Figure 10. Confirmation of the concept that transform type faults need not be at 90° to spreading centers (after Sharman, 1976).



after SHARMAN, 1976

XBL 798-11493

Figure 11. A cartoon of the possible evolution of the San Andreas, Imperial, and Cerro Prieto faults illustrating where fracture zones should exist if these faults are pure transform types.



XBL 797-7557B

Figure 12. Earthquake epicenters and recorded magnitudes in the Salton Trough for events of Richter magnitude ≥ 5 .

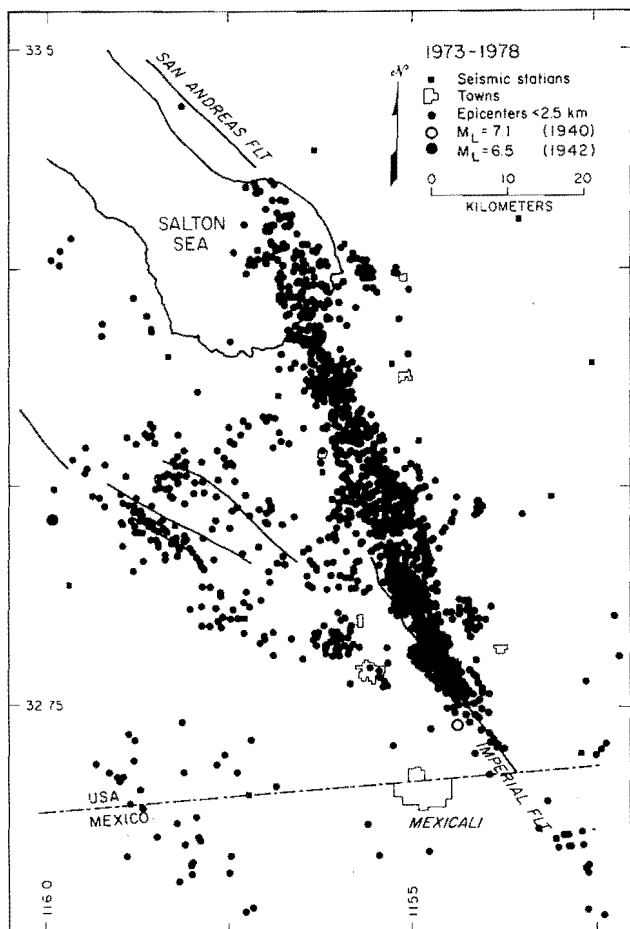


Figure 13. Central Salton Trough epicenters showing the connecting activity between the Imperial and San Andreas faults (data from Johnson, 3979). Epicenter location error less than 2.5 km. M_L refers to local Richter magnitude.

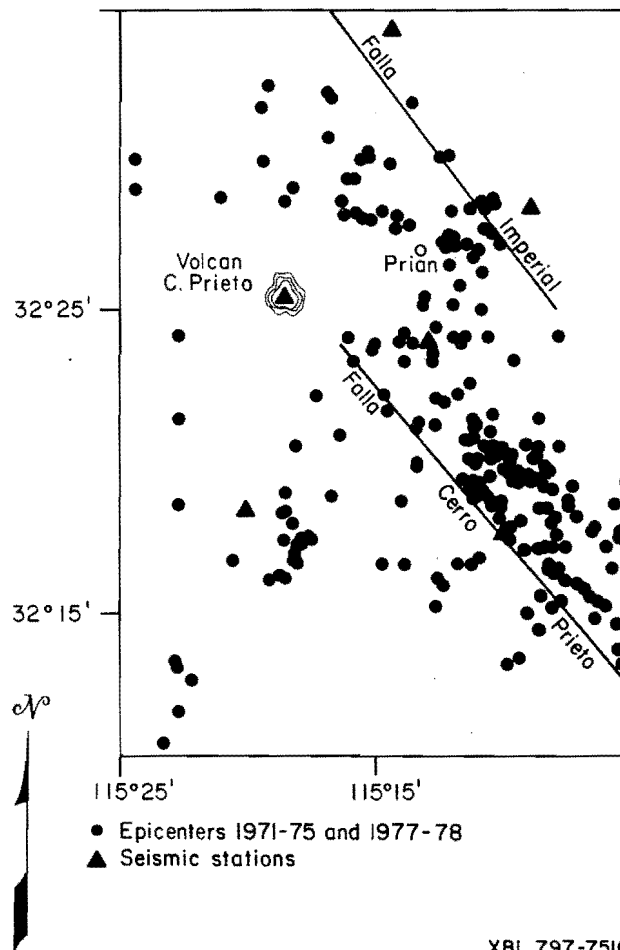
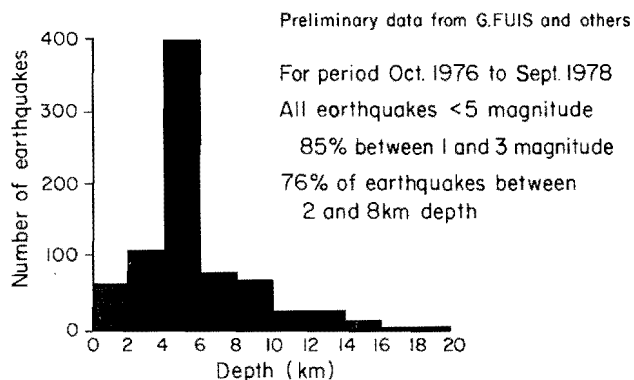


Figure 15. Earthquake epicenters in the vicinity of the Cerro Prieto and Imperial faults; data from Albores et al., 1979. Tectonic interpretations of recent movement between major en echelon faults are supported by these data and similar data along the north-trending zone between the Imperial and San Andreas faults.

XBL 797-7516

Central Salton Trough Earthquake Hypocenters



XBL 798-11492

Figure 14. Earthquake depths in the Salton Trough north of the Mexican-U.S. border, although difficult to quantify in the Salton Trough, show a concentration near geothermal fields in a zone from 2 to 6 km. (Richter magnitudes, local).

reservoirs modelers should consider that multiple basins separated by upraised blocks were formed sequentially. Perhaps such an arrangement of basins represents *episodic* shifts of the heat source on a scale of 5 to 20 km.

Another aspect of faulting related to spreading centers is indicated in Figure 10. The intersection angle between main fault and cross fault need not be 90° . Thus the geometry of the basins east of the present Cerro Prieto field can have margins as much as $\pm 20^\circ$ from normal or parallel to the major regional fault.

Figure 11 represents one of many possible modes of evolution of oceanic transform faults and spreading centers. These "cartoons" are intriguing for they suggest patterns that may fit regional geophysics data. For example, the Tule Check geothermal area 15 km northwest of Cerro Prieto could be an abandoned fracture zone, as seen in Figure 11 (D) with a remnant heat anomaly that is now cut off from the main Cerro Prieto and Imperial pull-apart system.

EARTHQUAKE DATA

A map of epicenters and magnitudes for the Salton Trough (Fig. 12) indicates a high degree of tectonic activity. A story is shown by a regional plot of microseismic events (Fig. 13). Our interpretation of these events, most of 1 to 3 Richter magnitude, is that they are predominantly a series of northeast-southwest cross-faults that link the Imperial and San Andreas faults. Over 800 events are plotted in Figure 14 with major concentrations at 4 to 6 km depth. The error on these depths could be as much as ± 2 km, (G. Fuis, 1978, personal communication; see also Fuis et al., 1977a, b, c, 1978a, b, c).

The fact that depths of occurrence are shallow is important evidence of repeated activity that maintains fracturing and allows fluid flow through fractures at geothermal production depths in the Salton Trough. More refined data on depths of earthquakes are needed for the Cerro Prieto area (Fig. 15) in order to document whether these events are in the production zone or at

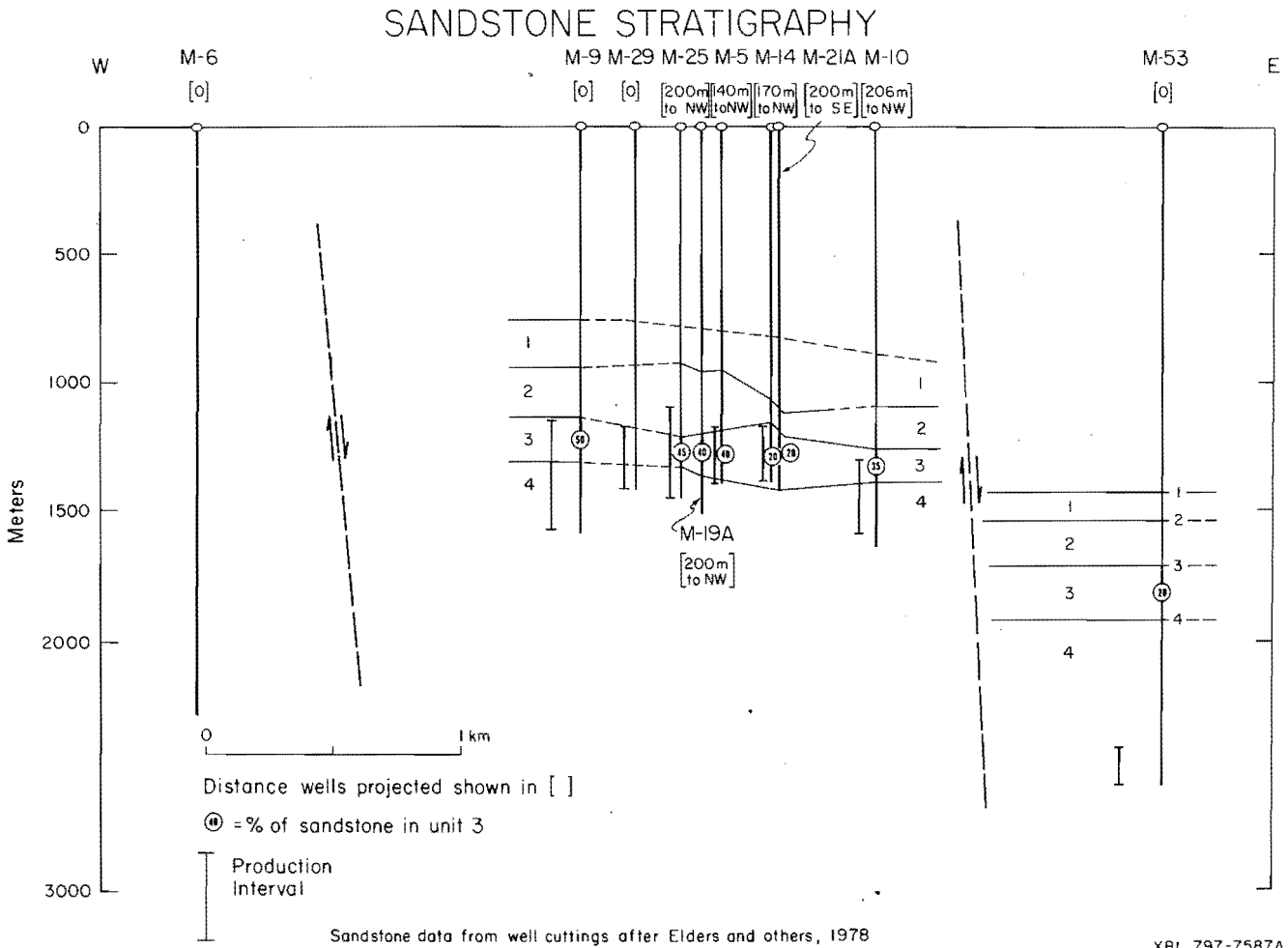


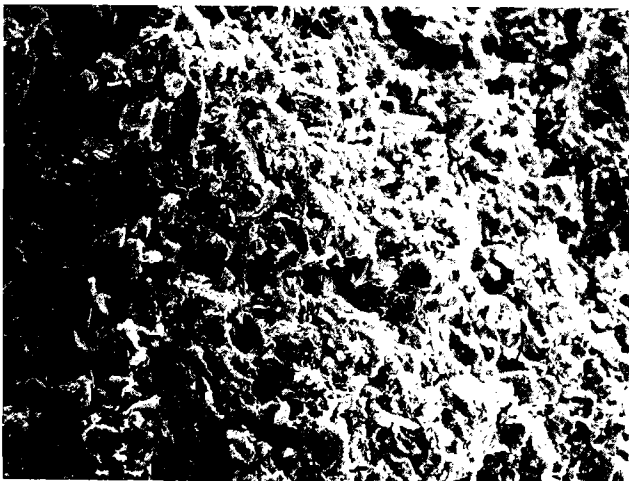
Figure 16. Sandstone units defined by relatively continuous major shale zones. Within the production reservoir the sandstone percentage, as in unit 3, varies from 20% to 50% with a minimum near well M-14 (see Fig. 5 for well locations).

the interface of the deltaic sediment and the basement of granodiorite, volcanics, and metasedimentary rocks.

SANDSTONE POROSITY

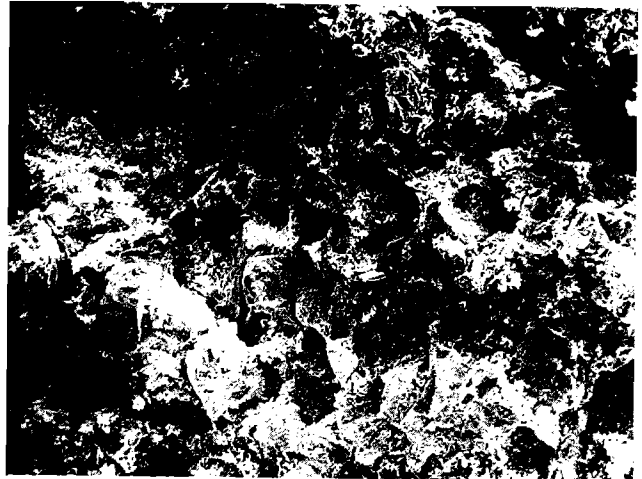
Figure 16 represents the basis of a working hypothesis, namely that zones of lower total sandstone percentage, approximately 20% to 50%, are better for geothermal production than zones of, say, 80% total sandstone. This hypothesis has two corollaries (1) secondary porosity caused by geothermal fluids is spotty throughout a field, and (2) fracture porosity is relatively greater in siltstones, shales, and sandstones that have been densified. Detailed comparison of sandstone percentage, lithofacies types, mineral data, and resistivity are in progress but available information support the hypothesis (Elders, 1980, personal communication; Wilt, 1980, personal communication).

Scanning electron microphotographs of well cuttings and cores reveal mineral dissolution and mineral precipitation, clogging of pore throats, and apparent phases of overgrowth. Selected photographs present an idea of these features. A laminated siltstone in well NL-1 at 1888 m (Fig. 17) shows little porosity and little densification, while deeper samples in NL-1 at 2720 m in the production region (Figures 18, 19, 20) illustrate clogging and precipitation. Figures 21 and 22 at 3209 m in the same well document a dramatic change to a metamorphosed zone with reduced secondary porosity. Well M-38 samples at 1215 to 1372 m show clay and framework minerals (Figs. 23 and 24) and M-3 at 2203 m (Fig. 25) is a spectacular example of silica mineral precipitation adjacent to clay minerals.



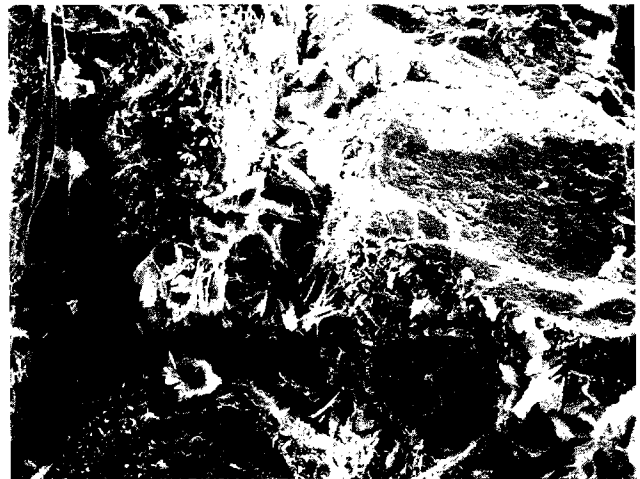
XBB 799-12528

Figure 17. Low-porosity laminated deltaic siltstone from well NL-1 at 1888 m depth; field of view across the SEM photograph is 0.2 mm.



XBB 799-12516

Figure 18. Sandstone showing mixed secondary porosity and newly precipitated hydrothermal minerals from production zone of well NL-1 at 2720 m depth. Field of view across the SEM photograph is 0.2 mm.



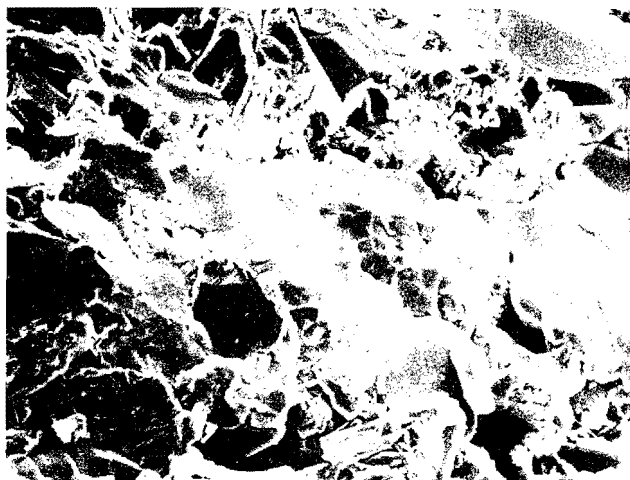
XBB 799-12511

Figure 19. Sandstone; closeup of the same sample as Figure 18. Note the long hairlike crystals (illite?) and wafery-shaped clay or zeolite minerals partially filling a pore throat between sand grains. Sample taken at 2720 m depth from well NL-1. Field of view across the photograph is 0.2 mm. This is an example of altered secondary permeability effects.



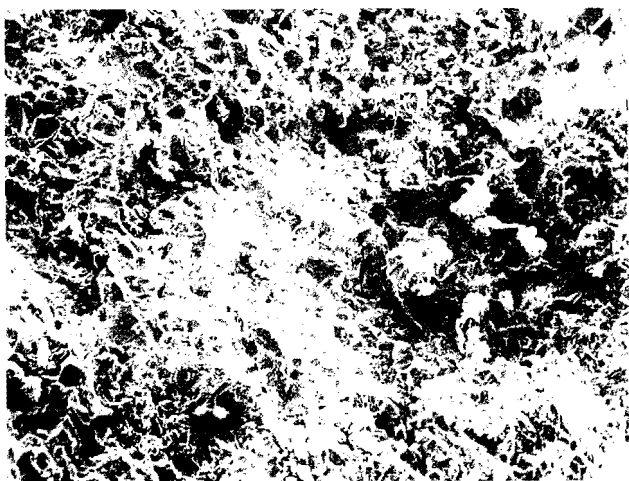
XBB 799-12518

Figure 20. Sandstone; closeup view of a portion of Figure 18. During sample preparation a grain was plucked leaving behind the hydrothermally precipitated clay cement. Sample from 2720 m depth in well NL-1. Field of view across the SEM photograph is 0.2 mm.



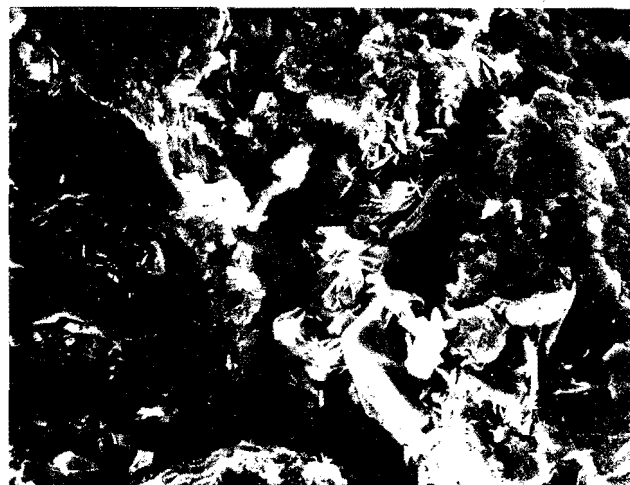
XBB 799-12527

Figure 22. Closeup of Figure 21 showing reduced porosity due to precipitation of framework minerals. Note how grains were broken during sample preparation compared with Figure 18. Sample from well NL-1 at 3209 m depth. Field of view across the SEM photograph is 0.5 mm.



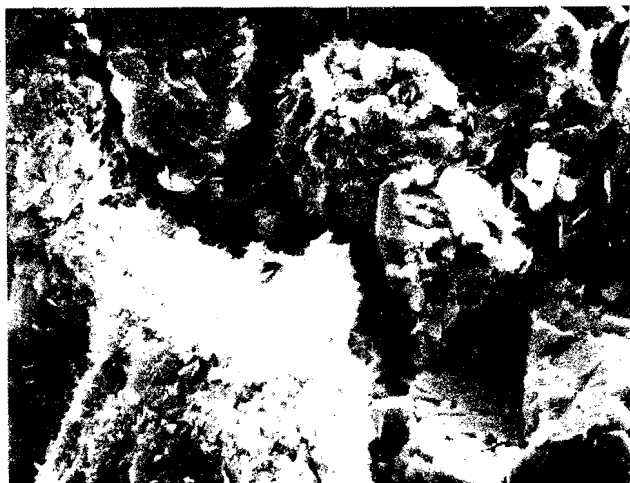
XBB 799-12524

Figure 21. Metamorphosed very dense sandstone from well NL-1 at 3209 m depth. Field of view is 1.0 mm. This is an example of a super-mature secondary porosity zone susceptible to microfracturing.



XBB 797-9450

Figure 23. Clay and framework minerals, or mineral overgrowth in a pore space. Sample taken from well M-38, at depths from 1215 to 1372 m; field of view across the SEM photograph is 0.1 mm.



XBB 797-9451

Figure 24. Leaching of a crystal face and a massive clay mineral aggregate. Samples taken from well M-38 at 1215 m depth. Field of view in the SEM image is 1.0 mm.



XBB 797-9459

Figure 25. Nearly pure silicate minerals (EDAX scan shows only Si) adjacent to honeycomb clays (Fe, Mg, Al rich) overgrowths. Both features greatly reduce permeability. Sample from well M-3, at 2203 m depth. Field of view across the SEM photograph is 0.05 mm.

ACKNOWLEDGMENT

Work performed for the U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, under contract W-7405-ENG-48.

REFERENCES CITED

- Albores L. A., Reyes Z. C. A., Brune, J. N., González G. J., Garcilazo M. L., and Suárez V. F., 1979, Seismicity studies in the region of the Cerro Prieto geothermal field, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 227-238.
- Alonso E. H., 1966, La zona geotérmica de Cerro Prieto, Baja California: Soc. Geol. Mexican Bol., v. 29, p. 17-47.
- Alonso E. H., Domínguez A. B., Lippmann, M. J., Mañón M. A., Schroeder, R. C., and Witherspoon, P. A., 1979, Recent activities at the Cerro Prieto field, *in* Kruger, P., and Ramey, H. J., Jr., eds., Proceedings, Fourth Workshop, Geothermal Reservoir Engineering, December 1978: Stanford, Stanford University p. 5-14.
- Babcock, E., 1974, Geology of the northeast margins of the Salton Trough, Salton Sea, California: Geological Society America Bulletin, v. 85, p. 321-332.
- Barnard, F., 1968, Structural geology of the Sierra de los Cucapas, northeastern Baja California (Ph. D. dissertation): Denver, University of Colorado, 155 p.
- Biehler, S., Kovach, R., and Allen, C. R., 1964, Geophysical framework of northern end of the Gulf of California structural province, *in* van Andel, T. H., and Shor, G. G., ed., Marine geology of the Gulf of California: Amer. Assoc. Petroleum Geol., Memoir 3, p. 126-143.
- Chan, T. and Tewhey, J. D., 1977, Subsurface structure of the southern portion of the Salton Sea geothermal field: Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-52354, 13 p.
- Choukroune, P., Francheteau, J., and Le Pichon, X., 1978, In situ structural observations along Transform fault A in the FAMOUS area, Mid-Atlantic Ridge; Geological Society America Bulletin, v. 89, p. 1013-1029.
- Corwin, R. F., Díaz C. S., and Rodríguez B. J., 1978, Self-potential survey at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7065.
- Crowe, B. M., 1978, Cenozoic volcanic geology and probable age of inception of basin-range faulting in the southeasternmost Chocolate Mountains, California: Geological Society America Bulletin, v. 89, p. 251-264.
- de Boer, J., 1980, Paleomagnetism of the Quaternary Cerro Prieto, Crater Elegante, and Salton Buttes volcanic domes in the northern part of the Gulf of California rhomb-chasm: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-9742.
- Deep Sea Drilling Project, 1979, Leg 64 seeks evidence on development of basins in the Gulf of California: Geotimes, v. , no. p. 18-20.
- De la Fuente, M., and Sumner, J., 1974, Estudio aeromagnético del Delta del Río Colorado, Baja California, México; Geofísica Internacional, v. 14, p. 35-48.
- Delaney, P., and Pollard, D. D., 1980, Deformation of host rocks and flow of magma during growth of minette dikes and breccia bearing intrusions near Shyrock, New Mexico. U. S. Geol. Survey prof. paper (in press).
- Dokka, R. K., and Merriam, R. H., 1979, Tectonic evolution of the main gulf escarpment between latitude 31°N and

- 30°N, northeastern Baja California, Mexico, in Abbott, R. L., and Gastil, R. G., eds., *Baja California Geology: San Diego, San Diego State University*, p. 139-147.
- Donnelly, M. F., 1974, *Geology of the Sierra del Pinacate volcanic field, northern Sonora, Mexico, and southern Arizona*, U. S. (Ph. D. dissertation): Stanford, Stanford University, 722 p.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., Olson, E. R., McDowell, S. D., and Collier, P., 1978, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: Petrology and light stable isotope geochemistry of twenty-three wells in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Riverside, California, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Report UCR/IGPP-78/26, p. 263.
- Fuis, G., and others, 1977a, Preliminary catalogues of earthquakes in the northern Imperial Valley, California: U. S. Geological Survey Open-File Report, 77-694.
- , 1977b, Preliminary catalogues of earthquakes in the northern Imperial Valley, California: U. S. Geological Survey Open-File Report, 77-869.
- , 1977c, Preliminary catalogues of earthquakes in the northern Imperial Valley, California: U. S. Geological Survey Open-File Report, 77-431.
- , 1978a, Preliminary catalogues of earthquakes in the northern Imperial Valley, California: U. S. Geological Survey Open-File Report, 78-74.
- , 1978b, Preliminary catalogues of earthquakes in the northern Imperial Valley, California: U. S. Geological Survey Open-File Report, 78-671.
- , 1978c, Preliminary catalogues of earthquakes in the northern Imperial Valley, California: U. S. Geological Survey Open-File Report, 78-673.
- Gastil, G., and Krummenacher, D., 1977, Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahia Kino: *Geological Society America Bulletin* v. 88, p. 189-198.
- Gastil, R. G., Phillips, R. P., and Allison, E. C., 1975, Reconnaissance geology of the State of Baja California: *Geological Society America Memoir* 140, 170 p.
- Goulty, N. R., and Golman, R., 1978, Repeated creep events on San Andreas Fault near Parkfield, California, recorded by a Strainmeter array: *Journal Geophysical Research*, v. 83, p. 5415-5419.
- Heney, T., and Bischoff, J., 1973, Tectonic elements of the northern part of the Gulf of California: *Geological Society America Bulletin*, v. 84, p. 315-330.
- Hileman, J. A., Allen, C. R., and Nordquist, J. M., 1973, Seismicity of the southern California region 1932 to 1972: Pasadena, Seismological Laboratory, California Institute of Technology, 94 p.
- Howard, J., et al., 1979, Geothermal resource and reservoir investigations of U. S. Bureau of Reclamation leaseholds at East Mesa, Imperial Valley, California: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7094; 305 p.
- Johnson, C. E., 1979, I, CEDAR an approach to the computer automation of short-period local seismic networks; II, Seismotectonics of the Imperial Valley of Southern California (Ph. D. dissertation): Pasadena, Calif. Inst. Technology, 332 p.
- Johnson, C. E. and Hadley, D. M., 1976, Tectonic implications of the Brawley earthquake swarm, Imperial Valley, January, 1975: *Bulletin Seismological Society America*, v. 66, p. 1133-1144.
- Kasameyer, P., 1976, Preliminary interpretation of resistivity and seismic refraction data from the Salton Sea geothermal field: Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-52115, 10 p.
- Kasameyer, P., Younker, L., and Tewhey, J., 1978, Salton Sea geothermal system: II, Thermal source modeling and resource assessment: Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, 30 p., unpub. report.
- Lofgren, B. E., 1979, Measured crustal deformation in Imperial Valley, California, in *Proceedings, First Symposium on Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978*: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 141-145.
- Lonsdale, P., and Lawver, L. A., 1980, Submersible study of immature plate boundary zones in the Gulf of California: *Geological Society America Bulletin*, 8 p. (in press).
- Mañón M. A., Mazor, E., Jiménez S. M. E., Sánchez A. A., Fausto L. J. J., and Zenizo, C., 1977, Extensive geochemical studies in the geothermal field of Cerro Prieto, Mexico: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7019, 113 p.
- Meidav, T., and Howard, J. H., 1979, An update of tectonics and geothermal resource magnitude of the Salton Sea geothermal resource: *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 3, p. 445-448.
- Meidav, T., and Rex, R., 1970, Investigation of geothermal resource in the Imperial Valley: Riverside, California, Institute Geophysics and Planetary Physics, University of California, 54 p.
- Meidav, T., et al., 1976, An electrical resistivity survey of the Salton Sea geothermal field, Imperial Valley, California; Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-13690, v. 1 and 2, 68 p.
- Mercado G. S., 1976, Movement of geothermal fluid and temperature distribution in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, in *Proceedings Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, May 1975: Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, v. 1, p. 492-494.
- Noble, J. E., Mañón M. A., Lippmann, M. J., and Witherspoon, P. A., 1977, A study of the structural control of fluid flow within the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Dallas, Society of Petroleum Engineers, SPE-6763.
- Ortlieb, L., 1978, Neotectonics from marine terraces along the Gulf of California, in *Proceedings, Symposium on Earth Rheology and Late Isostatic Movements*, Stockholm, 1977: New York, John Wiley and Sons.
- Phillips, R. P., 1964, Seismic refraction studies in the Gulf of California, in van Andel, T. H., and Shor, G. G., eds., *Marine geology of the Gulf of California*: Amer. Assoc. Petro. Geol., Memoir 3, p. 90-121.
- Prian C. R., 1979, Lithologic conditions of the Cerro Prieto wells based on well interpretations; in *Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978*: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 49-56.
- Proctor, R. J., 1968, *Geology of the Desert Hot Springs/Upper Coachella Valley area, California*: San Francisco, California Division of Mines and Geology, Special Report, 50 p.
- Puente C. I., and de la Peña L. A., 1979, Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto, in *Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, September 1978*: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory LBL-7098; p 17-40.
- Razo, A., 1976, Sinopsis geológica del campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California: Mexicali, Comisión Federal de Electricidad. Internal report.
- Reed, M. J., 1976, *Geology and hydrothermal metamorphism*

- in the Cerro Prieto geothermal field, Mexico, *in* Proceedings, Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, May 1975: Washington, D. C., U. S. Government Printing office, v. 1, p. 539-547.
- Sharman, G., 1976, The plate tectonic evolution of the Gulf of California (Ph. D. dissertation): San Diego, University of California, 86 p.
- Sharp, R. V., 1976, Surface faulting in the Imperial Valley during the earthquake swarm of January-February, 1975: *Bulletin Seismological Society of America*, v. 66, p. 1145-1154.
- Soto-Pineda, S., 1975, Campo geotérmico de Cerro Prieto sobre la falla San Jacinto y su posible ampliación hacia la falla Imperial. Comisión Federal de Electricidad, México, Internal Report, June, 13 p.
- Summer, J. R., 1972, Tectonic significance of gravity and aeromagnetic investigations at the head of the Gulf of California: *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, p. 3103-3120.
- Sylvester, A. G., and Smith, R. R., 1976, Tectonic transposition and basement-controlled deformation in the San Andreas fault zone, Salton Trough, California: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 60, p. 2081-2101.
- Terres, R., and Crowell, J. C., 1979, Plate tectonic framework of the San Andreas/Salton Trough juncture, *in* *Tectonics of the juncture between the San Andreas fault system and the Salton Trough, southeastern California*: San Diego, University of California, p. 15-26.
- Tewhey, J. D., 1977, Geologic characteristics of a portion of the Salton Sea geothermal field; Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-52267, 51 p.
- Todd, V. R., and Hoggatt, W. C., 1976, Elsinore fault zone in the Tierra Blanca Mountains, Eastern San Diego Log California (abstract): *Geological Society of America, Program and Abstracts*, p. 416-417.
- Truesdell, A. H., 1979, The use of fluid geochemistry to indicate reservoir processes at Cerro Prieto, Mexico, *in* Kruger, P., and Ramey, H. J., Jr., eds., *Proceedings, Fourth Workshop, geothermal reservoir engineering*, Stanford, December, 1978: Stanford, Stanford University, p. 239-242.
- U. S. Geological Survey, 1972, The Borrego Mountain earthquake of April 9, 1968: U. S. Geological Survey Professional Paper 787, 207 p.
- Valette, J. N., and Esquer P. I., 1979, Geochemistry of superficial emissions in the Cerro Prieto Geothermal Field (abstract), *in* *Program and Abstracts, Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, October 17-19: Mexicali, Comisión Federal de Electricidad*, p. 32-33.
- Vonder Haar, S. P., and Gorsline, D. S., 1975, Flooding frequency of hypersaline coastal environments using orbital imagery—geologic implications; *Science*, v. 190, p. 147-149.
- , 1977, Hypersaline lagoon deposits and processes in Baja California, Mexico: *in* *Geoscience and Man*, v. 17, p. 165-177.
- , 1979, Flooding frequency and sedimentation unit correlation of tidal flat and coastal saline facies along the upper Gulf of California, Mexico: *Geological Society America Abstracts with Programs, Annual Mtg., November 1979*, p. 533.
- Vonder Haar, S., and Puente C. I., 1979, Fault intersections and hybrid transform faults in the southern Salton Trough geothermal area, Baja California, Mexico: *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 3, p. 761-764.

INTERSECCION DE FALLAS Y ESTRATIGRAFIA DE ARENISCAS EN EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

RESUMEN

La falla de Cerro Prieto, de dirección aproximada NO-SE, es parte de un lineamiento regional principal que se extiende a Sonora y tiene características de falla de desplazamiento de rumbo y de falla transformada oceánica. En apariencia, penetra profundamente en el basamento y en las rocas de la corteza del área y sirve como conducto para flujos grandes y rápidos de calor. Cerca del pozo M-103, donde la falla de Michoacán interseca oblicuamente una falla más corta de dirección aproximada NE-SO,

grandes pérdidas de circulación durante las perforaciones indican mayor permeabilidad y, en consecuencia, un mayor flujo natural convectivo de fluido. En la zona S del campo hay una zona de fallas de cizalla en la vecindad de los pozos M-48, M-91 y M-101. Los mapas de contornos de temperaturas sugieren que esta zona de cizalla ayuda en la rápida distribución del fluido geotérmico hacia afuera de la zona de la falla de Cerro Prieto, aumentando de esta forma la recarga.

Se estudió la distribución de litologías y temperatura dentro del campo comparando datos de recortes de pozos, núcleos, registros de pozos y análisis geoquímicos. A través de la porción del campo primeramente desarrollada, en particular a lo largo de una sección de 1.25 km de dirección aproximada NE-SO desde el pozo M-9 al M-10, emergen correlaciones interesantes que indican una relación entre la litología, el microfracturamiento y la distribución de temperatura. En la porción superior del yacimiento A de esta sección estratigráfica, entre 1200 y 1400 m, el porcentaje de areniscas varía entre 20 y 55. Las temperaturas, basadas en registros de pozos, máximos isotópicos de calcita e índices Na-K-Ca, se encuentran en la gama 225-275°C. El estudio muestra que una alta isoterma en esta vecindad corresponde al porcentaje total más bajo de areniscas. Microfotografías de barrido electrónico de núcleos y recortes de pozos correspondientes a unidades de areniscas y lutitas revelan obstrucciones, disolución y precipitación mineral a lo largo de las microfracturas. Nuestra hipótesis de trabajo es que estas facies de lutitas arenosas y limolitas son muy proclives a microfracturarse y que a su vez dicho microfracturamiento permite que los fluidos de alta temperatura fluyan hacia profundidades más superficiales en el yacimiento.

Por lo común se llevan a cabo investigaciones dirigidas a lograr un modelo geológico coherente que muestre la capacidad del yacimiento y a entender el flujo de fluido a lo largo de fallas principales, la distribución lateral a través de zonas de fallas de cizalla y el movimiento variable dentro de sedimentos deltaicos que han sido parcialmente microfracturados.

INTRODUCCION

La evolución geológica de la región de Cerro Prieto ha sido una mezcla compleja de agrietamientos (*rifting*), sedimentación deltaica rápida y afallamiento de desplazamiento de rumbo, en gran escala. Para entender los campos geotérmicos en esta región es importante familiarizarse con las intersecciones de fallas y con los efectos del tectonismo y de las interacciones agua-roca en la porosidad y permeabilidad inicial de las areniscas. En este trabajo se exploran primeramente conformaciones de afallamiento análogas a las de Cerro Prieto y luego la permeabilidad y porosidad secundaria de los horizontes productivos.

AFALLAMIENTO DE LA DEPRESION DEL SALTON

En la figura 2 se muestra un número de intersecciones de fallas por medio de una recopilación detallada de afallamientos. Estos datos fueron recolectados de más de 100 artículos, algunos publicados y otros no. La figura 3 muestra referencias claves específicas. El área del Mar del Salton muestra una serie de fallas con dirección clara NE-SO; cada serie tiene aproximadamente 3 km de largo y se extiende entre la falla de desplazamiento de rumbo Banning/

Mission Creek (parte del sistema San Andrés) y el extremo N de la falla de desplazamiento de rumbo Brawley/Imperial (Fig. 4; también Meidav y Howard, 1979).

Fallas transversales similares, de dirección aproximada NE-SO (Fig. 5), han sido confirmadas en el campo de Cerro Prieto por estudios recientes (Vonder Haar y Puente, C., 1979; Puente, C. y de la Peña, L., 1979). La falla de Cerro Prieto de dirección aproximada NO-SE y un segmento de falla paralelo, la falla de Michoacán, son parte de un lineamento regional importante que llega hasta Sonora (Gastil y Krummenacher, 1977) y tiene características de una zona de fallas de desplazamiento de rumbo y una falla transformada oceánica (Vonder Haar y Puente, C., 1979). Se cree que este lineamento regional principal penetra profundamente en las rocas de la corteza y del basamento, que varían en espesor de 7 km en la parte N del Golfo de California (Phillips, 1964) a 20 km en el límite internacional entre Estados Unidos y México (Biehler *et al.*, 1964). Este estilo de afallamiento, constituido por una falla regional profunda con bloques sumergidos en las intersecciones de fallas, es importante en conexión con el acontecimiento de recursos geotérmicos porque aparentemente sirve como conducto para altos flujos de calor. La intersección oblicua de la zona de fallas de Pátzcuaro y la zona de fallas de Michoacán está asociada con pozos de gran permeabilidad, y por eso se presume que es un área de convección natural aumentada. Esta conclusión está basada en la prolífica producción del pozo M-103, en grandes cantidades de circulación perdida y en las manifestaciones superficiales del área de Laguna Volcano al SO del pozo M-101 (ver los artículos de De Boer, 1980, y también Valette y Esquer, P., 1979, por datos magnéticos y geoquímicos relacionados a la intersección de estas fallas).

Otra faceta de las intersecciones de fallas es el papel que desempeñan ayudando a distribuir los fluidos geotérmicos provenientes de fallas de penetración profunda, tal como la falla de Cerro Prieto. Se cree que en un momento dado del tiempo geológico, dicha falla fue una fuente lineal o hasta una fuente puntual discreta (Delaney y Pollard, 1980). Una falla única de control como la descrita, debería resultar en un campo que se extienda a unos pocos cientos de metros de ella. Sin embargo, la mayor permeabilidad, la capacidad de recarga y el almacenamiento que resultan de estas zonas de fallas de cizalla crean campos geotérmicos del orden de 2 a 10 km de ancho.

Aproximadamente 100 km al SE de Cerro Prieto, donde el lineamento de Cerro Prieto entra en el Golfo de California, hay una tercera área de afallamiento transversal (Fig. 2). Estas fallas han sido confirmadas por estudios de campo (Ortlieb, 1978). Aunque la zona de fallas de Cerro Prieto tiene un estilo escalonado en esta área, la frecuencia de inundaciones y los datos de duración indican que las aguas superficiales salinas impedirían levanta-

mientos geofísicos a nivel del suelo y perforaciones de pozos someros para la recolección de datos sobre el flujo de calor. Presumiblemente existe un recurso geotérmico a profundidad.

A otra faceta del afallamiento en la Depresión del Salton concerniría el origen del volcán de Cerro Prieto y el campo geotérmico adyacente. Ambos podrían ser el resultado de otra intersección de fallas: el encuentro de la zona de fallas de San Felipe, que limita la cuenca (Fig. 2), con el lineamiento de Cerro Prieto.

Hay otras indicaciones de intersección de fallas en el área de la Depresión del Salton/Golfo de California Superior. Datos magnéticos sugieren reactivación de antiguas fallas de rift (de Boer, 1980) y datos de gravedad regional indican que el lineamiento Gila se extiende hasta la Depresión del Salton, desde Arizona hasta las inmediaciones del extremo S de la falla Imperial.

ANALOGOS TECTONICOS DE CERRO PRIETO

La zona de rift del Mar Muerto, las cuencas productoras de petróleo en el S de California y la región de Afar en Africa, entre otras, proveen comparaciones estimulantes con la región de Cerro Prieto. Sin embargo, los modelos de afallamiento más útiles para los campos geotérmicos de la Depresión del Salton, provienen posiblemente de observaciones detalladas llevadas a cabo por sumergibles de buceo profundo a lo largo de fallas transformadas y centros hidrotérmicos en el área FAMOUS de la Cresta del Atlántico Medio y en el Golfo de California.

La exploración submarina de la falla transformada "A" en el área FAMOUS se resume en un diagrama tridimensional (Fig. 6), en una escala apropiada para el campo de Cerro Prieto. Como se muestra en la figura 7, las fallas transversales y las normales se extienden hasta 5 km a ambos lados de la zona actual de movimiento de transformación activo, que fue localizado en una zona central de 200 m de ancho. En esta zona se notó actividad hidrotérmica (Fig. 8), como también numerosas fallas en gradería con un desplazamiento acumulativo de hasta 250 m.

Perforaciones en la boca del Golfo de California por el Deep Sea Drilling Project (DSDP) (Geotimes, julio 1979) proporcionaron como resultado una hipótesis sobre la apertura del Golfo que se relaciona con la interpretación de la geología estructural en la vecindad del campo de Cerro Prieto. La secuencia comenzó hace alrededor de 20 millones de años con granitos desgastados por la acción atmosférica y gravas aluviales. Posiblemente para el final del Mioceno (hace de 5 a 10 millones de años) tuvo lugar una etapa de agrietamiento con fallas lístricas (cóncava hacia arriba con un ángulo de inclinación decreciente a profundidad) en el basamento. Hace aproximadamente 4.5 millones de años, el asentamiento del terreno era activo y

comenzó la apertura del Golfo. La apertura del Golfo actual, relacionada con fallas de transformación, tuvo lugar hace aproximadamente 3.5 millones de años (ver también Terres y Crowell, 1979). Hasta la fecha, los estudios geofísicos realizados en el área de Cerro Prieto no han revelado fallas lístricas en el basamento. Sin embargo, es posible que existan fallas de rotación relacionadas con afallamiento temprano confinadas en áreas situadas a 50 km o más al O y SO del campo geotérmico (Gastil *et al.*, 1979; Dokka y Merriam, 1979). Es importante que los modelos geológicos de Cerro Prieto incluyan fallas del basamento más antiguas, que puedan acoplarse con fallas más recientes generadas por desplazamiento de rumbo. Dicho acoplamiento aumentaría la red potencial de flujo de fluido a lo largo de las fallas, extendiendo de este modo el área de energía máxima disponible para producción.

Los estudios llevados a cabo por medio de sumergibles en la Cuenca Guaymas, situada en la parte central del Golfo de California (Lonsdale y Lawvor, 1980), son también interesantes cuando se considera la geología del campo de Cerro Prieto. Estos estudios muestran una falla de transformación que tiene una zona de cizalla de aproximadamente 1 km de ancho. Las fallas transversales ocupan un área de 1 a 2 km de ancho y el fondo del mar tiene minerales hidrotérmicos que precipitaron entre 220° y 240°C, según indican los isótopos de oxígeno.

Investigaciones previas hechas por Sharman (1976) en el Golfo de California, proveen otro modelo posible de importancia (Fig. 9) para la zona situada entre las fallas Imperial y de Cerro Prieto. Mientras las perforaciones progresan en el yacimiento de Cerro Prieto, los modeladores deberían considerar que se formaron en secuencia cuencas múltiples separadas por bloques elevados. Es posible que esta distribución de cuencas represente desplazamientos episódicos de la fuente de calor en una escala de 5 a 20 km.

En la figura 10 se indica otro aspecto del afallamiento relacionado con los centros de dispersión. El ángulo de intersección entre la falla principal y la falla transversal no necesariamente es de 90°. De allí que la geometría de las cuencas situadas al E del campo actual de Cerro Prieto pueda tener desviaciones de hasta ± 20 respecto a las direcciones normal y paralela a la falla regional principal.

La figura 11 representa uno de los varios modos posibles de evolución de las fallas de transformación oceánicas y de los centros de dispersión. Estos diagramas son importantes porque sugieren patrones que podrían ajustarse a los datos geofísicos regionales. Por ejemplo, el área geotérmica de Tule Check, situada 15 km al NO de Cerro Prieto, podría ser una zona de fracturas abandonada, como se ve en la figura 11 (D), con una anomalía residual de calor que en la actualidad se encuentra separada del sistema principal de Cerro Prieto e Imperial.

DATOS SISMICOS

Un mapa de epicentros y magnitudes para la Depresión del Salton (Fig. 12) indica un alto grado de actividad tectónica. En la figura 13 se muestra una historia de los sucesos microsísmicos por medio de un gráfico regional. La interpretación de estos sucesos, la mayoría de ellos de magnitud entre 1 y 3 en la escala Richter, es que son predominantemente una serie de fallas transversales de dirección NE-SO que vinculan las fallas Imperial y San Andrés. En la figura 14 se grafican más de 800 sucesos que se concentran principalmente entre 4 y 6 km de profundidad. El error en estas profundidades puede llegar a ser de hasta ± 2 km (G. Fuis, 1978, comunicación personal; ver también Fuis *et al.*, 1977 a, b, c, 1978 a, b, c).

El hecho de que las profundidades de ocurrencia sean someras es una evidencia importante de actividad repetida que mantiene el fracturamiento y permite el flujo de fluido a través de fracturas a profundidades de producción geotérmica en la Depresión del Salton. Se necesitan datos más precisos sobre las profundidades de los sismos en el área de Cerro Prieto (Fig. 15) para documentar si estos sucesos tienen lugar en la zona de producción o en la interfase de los sedimentos deltaicos y el basamento de granodioritas, vulcanitas y rocas metasedimentarias.

POROSIDAD DE LAS ARENISCAS

La figura 16 representa la base de una hipótesis de trabajo: que zonas con porcentajes totales de areniscas bajos, aproximadamente 20% a 50%, son mejores para la producción geotérmica que zonas con, por ejemplo, 80% de areniscas. Esta hipótesis tiene dos corolarios: 1) la porosidad secundaria causada por fluidos geotérmicos no es uniforme a través del campo, y 2) la porosidad de fracturas es relativamente mayor en limolitas, lutitas y areniscas que han sido densificadas. Actualmente se está haciendo una comparación detallada de porcentaje de areniscas, tipos de litofacies, datos de minerales y resistividad, pero la información disponible corrobora la hipótesis (Elders, 1980, comunicación personal; Wilt, 1980, comunicación personal).

Microfotografías de barrido electrónico de recortes y núcleos de pozos revelan disolución y precipitación mineral, atascamiento de gargantas de poros y fases aparentes de sobrecrecimiento. Algunas fotografías seleccionadas ilustran estos rasgos. Una limolita laminada del pozo NL-1, a 1888 m (Fig. 17), muestra poca porosidad y poca densificación, mientras que muestras más profundas en NL-1, a 2720 m en la zona de producción (Fig. 18, 19, 20), revelan atascamiento y precipitación. Las figuras 21 y 22, a 3209 m en el mismo pozo, documentan un cambio dramático a una zona metamorfoseada con porosidad secundaria reducida. Muestras del pozo M-38 entre 1215 y 1372 m indican arcilla y minerales de armazón (Figs. 23 y 24) y

el pozo M-3 a 2203 m (Fig. 25) es un ejemplo espectacular de precipitación mineral de sílice adyacente a minerales arcillosos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue ejecutado para el U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, bajo contrato W-7405-ENG-48.

TITULOS DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa de localización de la geología regional del campo geotérmico de Cerro Prieto.
- Figura 2. Fallas de la Depresión del Salton que indican la zona de afallamiento transversal y las principales fallas de transformación híbrida de dirección NO-SE.
- Figura 3. Mapas de referencias a artículos sobre el afallamiento de la Depresión del Salton. 1) Barnard, 1968; 2) USGS, 1972; 3) Henyey y Bischoff, 1973; 4) Gastil *et al.*, 1975; 5) Meidav y Rex, 1970; 6) Howard *et al.*, 1979; 7) Donnelly, 1974; 8) Ortlieb, 1978; 9) Vonder Haar y Gorsline, 1977; 10) Vonder Haar y Gorsline, 1975; 11) Puente C. y Vonder Haar, 1980; 12) Gastil y Grummscher, 1977; 13) Sumner, 1972; 14) Sharp, 1976; Johnson y Hadley, 1976; 15) Gouity y Golman, 1978; 16) de la Fuente y Sumner, 1974; 17) Sylvester y Smith, 1976; 18) Babcock, 1974; 19) Proctor, 1968; 20) Noble *et al.*, 1977; Razo, 1976; Alonso, 1966; Reed, 1976; Mercado, 1976; Vonder Haar y Puente, C., 1979; Prian, C., 1979; Corwin *et al.*, 1978; y Alonso *et al.*, 1979; 21) Puente, C. y de la Peña, L., 1979; 22) Soto-P., 1975; 23) Crowe, 1978; 24) Kasameyer, 1976; Kasameyer *et al.*, 1978; 25) Lofgren, 1979; 26) Meidav *et al.*, 1976; 27) Tewhey, 1977; 28) Chan y Tewhey, 1977; 29) Todd y Hoggatt, 1976; 30) Albores *et al.*, 1979.
- Figura 4. Mapa estructural de la región del Mar del Salton, basado en datos geofísicos combinados.
- Figura 5. Fallas en la vecindad del campo de Cerro Prieto, que muestran fallas transversales y el muy productivo pozo M-103.
- Figura 6. Diagrama interpretativo de una porción de la falla de transformación oceánica "A" en el área FAMOUS de la Cresta del Atlántico Medio (Choukroune *et al.*, 1978). Las fallas que se intersectan y la zona activa del movimiento de desplazamiento del rumbo, de 200 m de ancho dentro de una depresión de 4 km de ancho, sugieren la posible complejidad del afallamiento a lo largo de la falla de Cerro Prieto y dentro del campo de producción.
- Figura 7. Diagrama que ilustra el complejo afallamiento existente en las inmediaciones de una falla de transformación oceánica; posible análogo de las fallas de la Depresión del Salton.
- Figura 8. Sección transversal de la falla de transformación oceánica "A", basada en buceos de inmersión profunda, que muestra un afallamiento activo dentro de una zona de fallas más ancha.
- Figura 9. Interpretación de la evolución de la Cuenca Carmen en el Golfo de California; una posible analogía con las cuencas separadas en la Depresión del Salton. Nótese la asimetría y la formación de múltiples cuencas entre las dos fallas de transformación.
- Figura 10. Confirmación del concepto de que las fallas de tipo de transformación no necesitan estar a 90° de los centros de dispersión (Sharman, 1976).
- Figura 11. Un diagrama de la posible evolución de las fallas de San Andrés, Imperial y de Cerro Prieto que ilustra dónde deberían estar las zonas de fracturas si estas fa-

- llas fueran del tipo de transformación puro.
- Figura 12. Epicentros de sismos y magnitudes registradas en la Depresión del Salton para eventos de magnitud ≥ 5 en la escala Richter.
- Figura 13. Epicentros de la Depresión Central del Salton que muestran la actividad que vincula las fallas Imperial y de San Andrés (datos de Johnson, 1979). Error en la ubicación del epicentro menor que 2.5 km. M_L representa la magnitud local Richter.
- Figura 14. Profundidades de sismos en la Depresión del Salton al N de la frontera entre México y Estados Unidos, aunque difíciles de cuantificar en la Depresión del Salton, muestran una concentración cerca de los campos geotérmicos en una zona de 2 a 6 km (magnitudes Richter, locales).
- Figura 15. Epicentros de sismos en la vecindad de las fallas Imperial y de Cerro Prieto; datos de Albores *et al.*, 1979. Interpretaciones tectónicas de movimientos recientes entre las principales fallas escalonadas son soportadas por estos datos y otros similares a lo largo de la zona de dirección aproximada N, entre las fallas Imperial y de San Andrés.
- Figura 16. Unidades de areniscas definidas por zonas principales de lutitas relativamente continuas. Dentro del yacimiento en producción el porcentaje de areniscas, como en la unidad 3, varía de 20% a 50%, con un mínimo cerca del pozo M-14 (ver Fig. 5 para ubicación del pozo).
- Figura 17. Limolitas deltaicas laminadas de baja porosidad del pozo NL-1 a 1888 m de profundidad; el campo de visión a través de la microfotografía de barrido electrónico es 0.2 mm.
- Figura 18. Arenisca que muestra porosidad secundaria mixta y minerales hidrotérmicos de precipitación reciente, obtenida en la zona de producción del pozo NL-1 a 2720 m de profundidad. El campo de visión a través de la microfotografía de barrido electrónico es 0.2 mm.
- Figura 19. Arenisca; vista magnificada de la misma muestra que aparece en la figura 18. Nótese los largos cristales filiformes (illita) y las arcillas con forma de oblea o minerales de ceolita que cubren parcialmente una garganta de poro entre granos de arena. Muestra tomada a 2720 m de profundidad del pozo NL-1. El campo de visión a través de la fotografía es 0.2 mm. Este es un ejemplo de efectos de permeabilidad secundaria alterada.
- Figura 20. Arenisca; vista magnificada de una porción de la figura 18. Durante la preparación de la muestra se arrancó un grano dejando a la vista el cemento arcilloso precipitado hidrotérmicamente. Muestra obtenida a 2720 m de profundidad en el pozo NL-1. El campo de visión a través de la microfotografía de barrido electrónico es 0.2 mm.
- Figura 21. Arenisca muy densa metamorfoseada obtenida en el pozo NL-1 a 3209 m de profundidad. El campo de visión es 1.0 mm. Este es un ejemplo de una zona de porosidad secundaria super-madura susceptible a microfracturamiento.
- Figura 22. Vista magnificada de la figura 21 que muestra porosidad reducida debido a la precipitación de los minerales del armazón. Nótese cómo se quebraron los granos durante la preparación de la muestra comparado con la figura 18. Muestra obtenida del pozo NL-1 a 3209 m de profundidad. El campo de visión a través de la microfotografía de barrido electrónico es 0.5 mm.
- Figura 23. Arcilla y minerales del armazón, o sobrecrecimiento mineral en un espacio de poro. Muestra obtenida del pozo M-38 a profundidades que varían de 1215 a 1372 m; el campo de visión a través de la microfotografía de barrido electrónico es 0.1 mm.
- Figura 24. Lixiviación de una cara del cristal y un agregado masivo de mineral de arcilla. Muestras obtenidas del pozo M-38 a 1215 m de profundidad. El campo de visión en la imagen de microscopía electrónica de barrido es 1.0 mm.
- Figura 25. Minerales de silicatos casi puros (el barrido EDAX muestra sólo Si) adyacentes a la estructura celular hexagonal de sobrecrecimiento de arcillas (ricas en Fe, Mg y Al). Ambos rasgos reducen enormemente la permeabilidad. Muestra obtenida del pozo M-3 a 2203 m de profundidad. El campo de visión a través de la microfotografía de barrido electrónico es 0.05 mm.